

2.5 太陽光発電にどこまで頼れるか

2011 年の東日本大震災と福島原子力発電所の事故以来、準国産エネルギーである原子力発電が稼働しない状況が続いている。この原稿を執筆している時点でも全国で 3 機のみが稼働している状況である。この状況は今後も続くと考えられ、震災以前に策定されたエネルギー基本計画のように原子力発電に頼る状況は考えにくい。

このような状況で、化石燃料への依存を高めることは CO₂ 排出削減の観点だけでなくエネルギーセキュリティの観点からも避ける必要がある。そのため再生可能エネルギーに追い風が吹き、再生可能エネルギー電源に対する手厚い発電電力固定価格買い取り制度 (FIT) が導入され、特に太陽光発電設備 (PV) の導入が急速に進んできた。そのペースは予想を大きく上回るものであり、認定された設備の容量は想定を遙かに越えるものとなってしまった。

そのため、2014 年後半になっていくつかの電力会社ではこれ以上の受入は困難だとして、その接続申込への回答を保留するという宣言を行った。一般にはこの保留措置は「突然」の出来事だったと受け止められている。

しかし、PV や風力発電のような自然エネルギーに頼る再生可能エネルギーは気象変動の影響を受けやすく、出力が不安定に変動することが知られている（このため、PV や風力発電を「自然変動電源」と呼ぶことがある）。電力システムは瞬時瞬時の需要と供給を一致させる必要があるため、変動が大きくなると運用が難しくなってしまう。電気エネルギー分野の専門家から見れば、技術的、経済的に適正な受け入れには限界があることは明らかであり、遅かれ早かれ接続が不可能になる時期が来ることが予想されていた。

そこで、ここでは、再生可能エネルギーの中でも日本において導入が進み、系統接続の問題が起きている PV を取り上げ、その特性と系統に接続するときの問題点について考える。

太陽光発電の出力は雲がまばらに空を覆っているような状況で特に大きく変動する。PV 出力変動の例を図 2.5.1 に示す。快晴 (clear) や雨 (rain) の時は出力変動が小さいが、曇 (あるいは空に雲がある状態の「晴」) の時は非常に急峻に出力が変動する。電力システムにおいては電力の供給量と需要量は瞬時瞬時にバランスがとれていなければならない、バランスが崩れると周波数変動、ひいては大停電に至ることもあるため、需要とのバランスは PV 以外の電源がとらなければならないことになる。PV は勝手に踊るダンサーのようなもので、それにうまく対応する上手なダンスパートナーの役割をその他の電源が果たさなければならないわけである。

ただ、太陽光発電は広範囲にわたって多数設置されるため、互いの出力がほぼ無相関になり、統計的性質によって全体としての出力が平滑化される。この効果を「ならし効果」と呼んでおり、かなり効果があることが知られている。

しかし、問題はならし効果が弱まる瞬間が稀頻度でも出現するかどうかである。図 2.5.2 は AMcDAS の 10 分間日照時

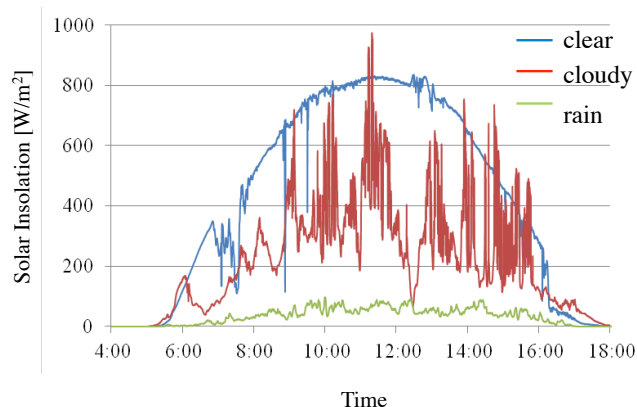


図 2.5.1 PV 出力変動の例

間データから各地点の日射量を推定し、14 地点分を足しあわ

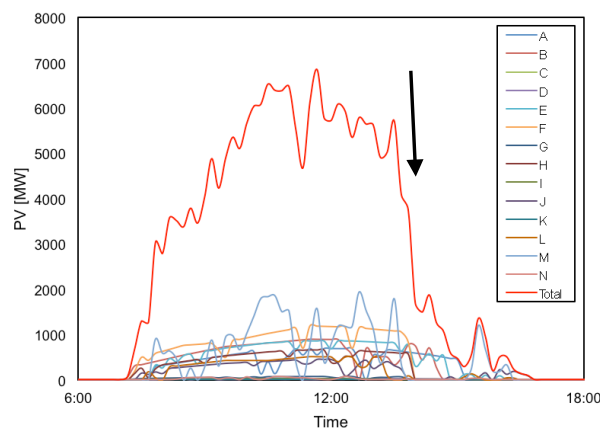


図 2.5.2 広域に設置された PV の合計出力

せたものである。一年分のデータの中から最も厳しいものを選んだのだが、矢印のところで合計出力が急峻に変化していることがわかる。このような状況はまれにしか発生しないので、「たまには周波数変動があっても良い」「たまには停電しても良い」ということであれば問題ない。しかし、電力供給ではそのようなことは許されない。このようなときにも対応することが求められる。

現在は各電力会社が最大限努力を行った結果、かなり接続可能量が増加してきているという印象であるが、逆に調整用の余力などを切り詰めたことによって運用が難しくなることが心配される。例えば地域間をつなぐ連系線を通る電力が大きく変動するといった影響がないかどうかといったことは検証していく必要があるだろう。

3.5 再生可能エネルギー電源はどこまで頼れるか

3.5.1 はじめに

2011 年の東日本大震災と福島原子力発電所の事故以来、準国産エネルギーである原子力発電が稼働しない状況が続いている。この原稿を執筆している時点でも全国で 3 機のみが稼働している状況である。この状況は今後も続くと考えられ、震災以前に策定されたエネルギー基本計画のように原子力発電に頼る状況は考えにくい。

このような状況で、化石燃料への依存を高めることは CO₂ 排出削減の観点だけでなくエネルギーセキュリティの観点からも避ける必要がある。そのため再生可能エネルギーに追い風が吹き、再生可能エネルギー電源に対する手厚い発電電力固定価格買い取り制度 (FIT) が導入され、特に太陽光発電設備 (PV) の導入が急速に進んできた。そのペースは予想を大きく上回るものであり、認定された設備の容量は想定を遙かに越えるものとなってしまった。

そのため、2014 年後半になっていくつかの電力会社ではこれ以上の受入は困難だとして、その接続申込への回答を保留するという宣言を行った。一般にはこの保留措置は「突然」の出来事だったと受け止められている。

しかし、PV や風力発電のような自然エネルギーに頼る再生可能エネルギーは気象変動の影響を受けやすく、出力が不安定に変動することが知られている（このため、PV や風力発電を「自然変動電源」と呼ぶことがある）。電力システムは瞬時瞬時の需要と供給を一致させる必要があるため、変動が大きくなると運用が難しくなってしまう。電気エネルギー分野の専門家から見れば、技術的、経済的に適正な受け入れには限界があることは明らかであり、遅かれ早かれ接続が不可能になる時期が来ることが予想されていた。

本稿では、再生可能エネルギーの中でも日本において導入が進み、系統接続の問題が起きている PV を取り上げ、その特性と系統に接続するときの問題点について解説を試みる。

3.5.2 PV の出力特性

PV の発電は日射に依存するため、夜に発電することはできず、昼であっても曇や雨のときは発電量が極端に少なくなる。年間を通した設備利用率（定格出力で 1 年中発電した場合に比べてどれだけの発電ができるか）は、日本においては 12% 程度といわれている。最近の電力系統の年負荷率（平均需要 ÷ 最大需要）は 65% 程度であるから、電力需要の全エネルギーを PV でまかなうためには最大需要の 5 倍以上の PV を設置しなければならない計算になる。

しかし、電気エネルギーは貯蔵するのが困難であり、最大需要の 5 倍もの出力不安定な電源を接続することは難しい。貯蔵に頼らないとすると、PV 出力が軽負荷期の需要を上回らないようにする必要があり、自ずと導入限界量が定まることになる。

もし PV 出力が需要を上回らないとしても、気象状況による出力変動への対処の問題は残る。PV の出力は天気によって

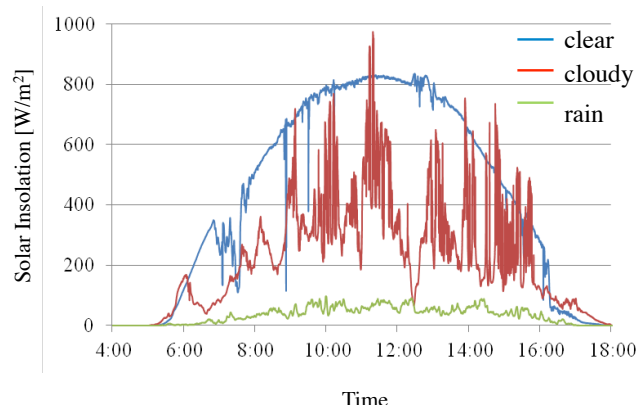


図 3.5.1 PV 出力変動の例

図 3.5.1（横浜国大で測定した例）のように変動する。快晴（clear）や雨（rain）の時は出力変動が小さいが、曇（あるいは空に雲がある状態の「晴」）の時は非常に急峻に出力が変動する。電力システムにおいては電力の供給量と需要量は瞬時瞬時にバランスがとれていなければならない、バランスが崩れると周波数変動、ひいては大停電に至ることもあるため、需要とのバランスは PV 以外の電源がとらなければならないことになる（図 3.5.2）。PV は勝手に踊るダンサーのようなもので、それにうまく対応する上手なダンスパートナーの役割をその他の電源が果たさなければならないわけである。

このような運転は PV 以外の電源（火力発電所など）によって過酷なものであり、効率の低下による発電単価の上昇を招くだけでなく、設備の寿命にも影響を与えることが懸念される。

3.5.3 PV 出力のならし効果

ただし、PV は広範囲にわたって多数設置されるため、互いの出力がほぼ無相関になり、統計的性質によって全体としての出力が平滑化されることが知られている。この効果を「ならし効果」と呼んでいる。図 3.5.1 の例は一地点で測定したもののなので、多数地点の出力の合計をとれば出力変動は穏やか

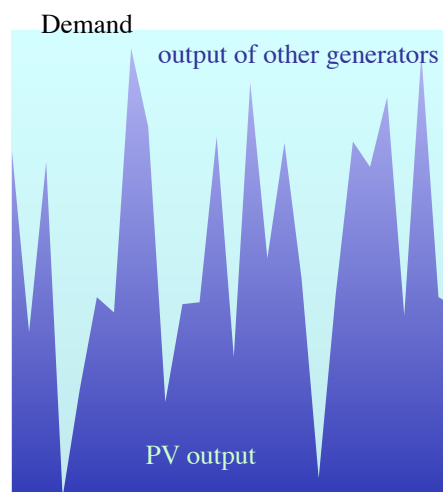


図 3.5.2 PV 出力と一般電源出力

になると期待される。

その効果を検証するため、5km 程度離れた 4 地点の日射量データを用い、それぞれの地点で FFT 解析を行って各周波数成分の大きさを足し合わせた場合（ならし効果を考慮していない場合）と各地点の出力を合計してから FFT 解析を行った場合（ならし効果が考慮されている）でどれだけ変動が抑制されているかを調べてみた。その結果を図 3.5.3 に示す。

ここでは 4 地点のデータを用いているので、全く無相関であれば-3dB になるはずである。結果を見ると晴れ（Fine）の日は周波数が非常に小さい（ゆっくりと変化する）領域を除いて大体-3dB となっていることがわかる。「晴れ」というのは雲量が 2~8（全天の 2 割から 8 割に雲がある）と定義されているので、雲によって出力変動が起こるような状況ではならし効果が効いていることがわかる。

快晴（Clear）、曇り（Cloudy）、雨（Rain）では晴れに比べてならし効果が小さいが、そのような天気ではもともと日射量の変動が小さいので他の電源に負担をかけることも少ないはずである。

このように、ならし効果が一般的にかなり効くことは知られている。しかし問題は「常に」効くのかどうかである。もし 1 年に一度でもならし効果が効かないときがあれば、ダンスパートナー（他の電源）が間に合わず、周波数変動が起ってしまう。

図 3.5.4 は AMeDAS の 10 分間日照時間データから各地点の日射量を推定し、14 地点分を足しあわせたものである⁽¹⁾。一年分のデータの中から最も厳しいものを選んだのだが、矢印のところで合計出力が急峻に変化していることがわかる。このような状況はまれにしか発生しないので、「たまには周波数変動があっても良い」「たまには停電しても良い」ということであれば問題ない。しかし、電力供給ではそのようなことは許されない。このようなときにも対応することが求められる。

3.5.4 PV の供給力としての価値

PV の設備利用率は 12%程度であると述べたが、それでは PV は供給力としてどれだけ期待できるのであろうか。東日本大震災以降に資源エネルギー庁が行っていた電力需給検証小委員会では、夏期の需要の大きい上位 3 日の PV 出力を 20 年

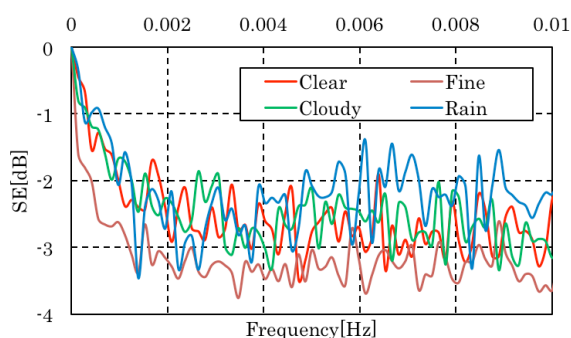


図 3.5.3 PV 出力のならし効果

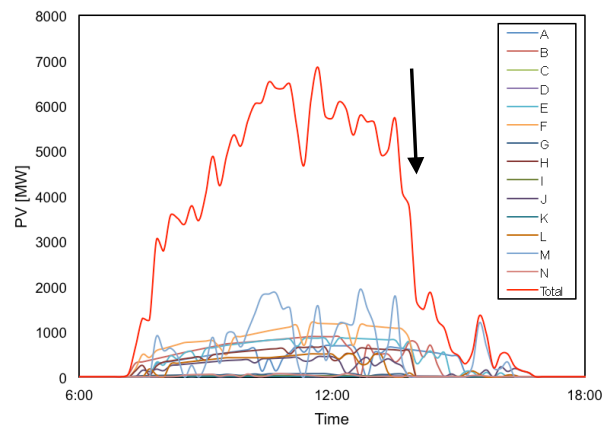


図 3.5.4 広域に設置された PV の合計出力

分集計し、そのうち下位 5 日の平均値を安定的に見込める供給力として評価している⁽²⁾。その考えでは、地域によっても異なるが供給力は設備容量の約 30%程度となっている。

これは、安定供給は堅持するという考え方に基づいた算定手法である。そのために「下位 5 日」といった形で少なめの評価が行われている。もちろん、安定供給のためには保守的な評価が必要だが、ここでは PV が従来電源を代替できる上限を求めることを試みたい。そのために総需要から PV 出力分を除いた「残余需要」の考え方で調べてみることにする⁽³⁾。残余需要は PV がフルに発電したときに PV 以外の発電設備で供給しなければならない需要分に相当する。

図 3.5.5、図 3.5.6 にその考え方を示す。まず各地域の負荷持続曲線（図 3.5.5 の上部の線）を用意する。次に時間毎の地域内平均日射量を調べ、それに PV 導入量を乗じることによって PV の出力を求める（図 3.5.5 の下部の棒グラフ）。そしてそれを総負荷量から引くと残余需要が中間のぎざぎざの線として求められる。さらにそれを大きい順に並べ替え、持続曲線とすると図 3.5.6 のようになる。この図の左端（ピーク時の需要）の差が PV 以外の電源の供給力を減らせる可能性のある量の上限である。

ここで注意してほしいのは、残余需要の求め方からも明らか通り、残余需要は PV の導入量によって変化するということである。PV は太陽が出ている昼間に出力するため、ピーク需要の削減効果があるといわれているが、導入量を増加させていくと昼間でも曇っているとき、あるいは夜間の需要が残り、残余需要のピーク削減効果が少なくなってしまうのである。実際に、PV 導入量が増加したここ 1-2 年の状況を見ると、ピーク需要が早朝や夕方に移動する現象が生じている。

PV 導入量に対してどれだけ残余需要のピークが削減できるかを PV の kW 価値と定義して、PV 導入量（各地域のピーク需要に対してどれだけ導入されるかの比率）を横軸にとって描いたものが図 3.5.7 である。この図を見ると、導入量が少なきは kW 価値が 50%を超えるような地域もあるが、導入量が多くなればなるほど kW 価値が低くなっていくことがわかる。なお、北海道地域に関しては需要がピークとなるのが日射のない冬期の夜になるため、kW 価値はほぼゼロとな

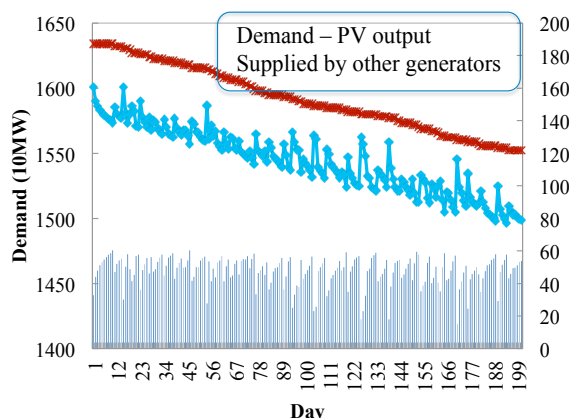


図 3.5.5 残余需要

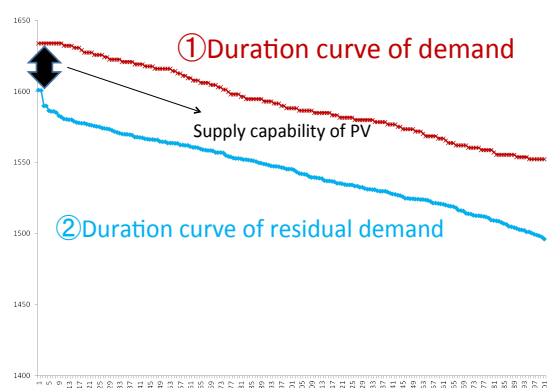


図 3.5.6 PV の供給力

る（図では横軸と重なってしまっているため見えない）。

この結果は（特に導入量が少ないうちは）需給検証小委員会の試算より大きくなっている。これははじめにも書いた通り、PV が従来電源を代替できる上限を求めているためである。この計算通りに従来型電源を減らしてしまえば、5 年に一度、10 年に一度の気象条件に対応することが出来ず、停電も覚悟しなければならない。

また、この計算では量的に足りているかどうか（電力システムの供給安定性を議論するときのアデカシーに相当）だけを見ており、ダイナミックな変化に追従して安定に運用できるかどうか（同セキュリティに相当）については全く考えていないことも指摘しておかなければならない。例えば図 3.5.4 に示したような PV 出力の急変が起こった場合に対応できるかどうかは前もってしっかりと検討しておく必要がある。

3.5.5 PV の接続可能量

「はじめに」でも述べたように、2014 年後半になっていくつかの電力会社では PV の接続申込への回答を保留するという宣言を行った。それを受けて資源エネルギー庁では新エネルギー小委員会の下に系統ワーキンググループを設置し、接続可能量の検討を行った⁽⁴⁾。

検討にあたっての大前提は、下記のようなことである（詳

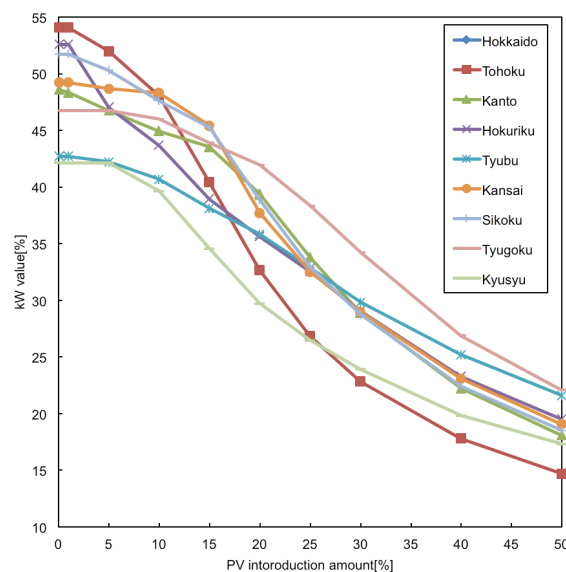


図 3.5.7 PV 導入量と kW 価値

細な設定は報告書を参照されたい）。

- 天候が急変して PV 出力がなくなっても大丈夫なように従来型の発電所を起動しておく。
- PV 出力は平均値ではなく、平均値から 2σ だけ多い状況を想定する。ただし、曇天、雨天日は平均値程度の出力が出るものとする。
- その上で、PV 出力が大きくなったときには火力等の発電所の出力減少、揚水発電所の揚水運転、可能な場合には連系線の活用などを最大限見込む。
- それでも PV 出力が余った場合には PV の出力抑制をかけるが、抑制日数はルールで定められた 30 日を超えないようにする。

各電力会社が最大限努力を行った結果、これまでよりはかなり接続可能量が増加したという印象であるが、逆に LFC 容量などを切り詰めたことによって運用が難しくなることが心配される。例えば連系線潮流が荒れるといった影響がないかどうかといったことは検証していく必要があるだろう。

今後さらに接続可能量を増加させるためには、

- 天候の予測精度向上と予測の活用方法の高度化
- 通信を利用した PV 出力抑制のさらなる活用
- デマンドレスポンスなどの確実な活用方法の開発等が求められる。

3.5.6 おわりに

再生可能エネルギー電源、特に PV 等の自然変動電源を電力システムに接続するのは簡単ではない。設備を導入してもその設備利用率は 12% 程度であり、エネルギー面の貢献は限られている。

出力変動特性はならし効果によって緩和されるが、どこまで緩和されるかについてはこれからの運用経験の積み重ねとそれに基づく研究成果を待つ必要がある。供給力としてどれ

だけ貢献できるか（kW 面の価値）についてもまだ評価を行っている途中である。本稿では触れなかったが、低圧ネットワークに接続されるために生じる問題（ローカルなネットワークがどれだけ PV による擾乱を吸収できるかという問題）も指摘されている。

種々の問題はあるが、再生可能エネルギーは純国産エネルギーとして活用を図っていくことが求められている。また、諸外国では日本よりも野心的な目標が設定されているところも多い。諸外国に盲目的に追従する必要はもちろんないが、電力システムの運用などにどのような違いがあるのかはきちんと検討し、技術的、経済的に導入可能量を増加するために、様々な課題を解決する努力を続けていく必要がある。

参考文献

-
- (1) Tsujii, et al., “Study on the Methods to Suppress the Frequency and Tie-Line Power Flow Fluctuation Due to High Penetration of Photovoltaic Generation Using the Existing Thermal Generators,” Proceedings of 4th Solar Integration Workshop, Berlin, Germany, Nov. 2014
 - (2) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会電力需給検証小委員会, 「電力需給検証小委員会報告書」, 平成 26 年 4 月
 - (3) 松本, 辻, 大山, 「予備力を考慮した電力系統における太陽光発電の kW 価値の算定手法の研究」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE15-011, 2015 年 1 月
 - (4) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会系統ワーキンググループ (第 3 回) 資料 9, 「各社接続可能量の算定結果 (暫定)」, 平成 26 年 12 月